

This is a postprint version of the published document at:

Alonso, M., Amarís, H., Rojas, B. y Hernández Calleja, L. (2016).
Gestión óptima de la generación distribuida en smart grids. En *Libro
Comunicaciones del III Congreso Smart Grids*, pp. 95-100.

<https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/comunicacion-gestion-optima-generacion-distribuida-smart-grids>



This article is licensed under a under a [Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivatives License 4.0 International License](#). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

GESTIÓN ÓPTIMA DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SMART GRIDS

Mónica Alonso, Profesora Visitante, Universidad Carlos III de Madrid

Hortensia Amarís, Profesora Titular, Universidad Carlos III de Madrid

Brenda Rojas, Personal en Formación, Universidad Carlos III de Madrid

Luis Hernández Callejo, Investigador, Universidad de Valladolid (Campus Universitario Duques de Soria)

Resumen: Las perspectivas energéticas a medio y largo plazo apuntan a un crecimiento de la generación distribuida y el autoconsumo en los próximos años. El desarrollo de estos aspectos requiere, tanto la existencia de un marco regulatorio adecuado, como la aplicación de mecanismos técnicos que permitan optimizar la integración de la generación distribuida en las redes eléctricas de distribución. En este trabajo se presenta la aplicación de técnicas de gestión de la generación distribuida basadas en Algoritmos Genéticos ante diversos escenarios de demanda y de generación. Las técnicas de optimización permiten maximizar la penetración de la generación distribuida en la red de distribución manteniendo la estabilidad del sistema eléctrico.

Palabras clave: Smart Grids, Distributed Generation (DG), Optimización

INTRODUCCIÓN

El aporte de las fuentes de generación renovable, ha venido impuesto principalmente por la necesidad de los países de no depender de los combustibles derivados del petróleo. Además, la conciencia medio ambiental que en los países desarrollados se tiene desde ya hace unos cuantos años, está posibilitando el despegue de diferentes tecnologías renovables. Desde la implantación de las plantas de generación renovable, en cualquiera de sus tecnologías, su característica común ha sido similar a la de las plantas clásicas, instalaciones en zonas alejadas de los núcleos de consumo (aunque cada vez cerca de ellos), así como con un elevado valor de potencia instalada.

Según la Comisión Nacional de la Energía (CNE), con el Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de pre-asignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos, supondrá *“una revisión a la baja de las previsiones de potencia a instalar por el régimen especial peninsular estimadas para el período 2011-2015”*. Durante 2012 solo se instalarían en España 97 MW fotovoltaicos, en cuanto a la eólica el informe dice que en 2012 se instalarían 474 MW, con respecto a la termosolar la previsión indica la instalación en 2012 de 970 MW y colapso total durante el trienio siguiente y cero megas para biomasa y cero para biogás durante los cuatro años. Esta información, y la evolución según la CNE, se muestran en la Tabla 1 para la península. En cambio, las previsiones de potencia instalada dadas por la CNE, con el mismo horizonte de tiempo, pero si no hubiera entrado en vigor el Real Decreto-ley, serían las mostradas en la Tabla 2 para la península. En ambas tablas se muestran la evolución de las diferentes tecnologías, en cuanto a potencia instalada, partiendo del año 2012 y hasta el 2015. Del análisis anterior, se evidencia una disminución de la potencia instalada total por parte del RE en la península de un 0.6% en 2012, 1.5% en 2013, 6% en 2014 y 9.56% en 2015. Este paro en la instalación del RE, según la CNE se deberá principalmente al citado Real Decreto-ley.

Con el escenario que se acaba de mostrar, parece no haber un futuro muy alentador para la energía renovable. No obstante, aparece el término Distributed Generation (DG – Generación Distribuida), dando una nueva oportunidad a las fuentes de generación renovable, y, además, posicionándolas en localizaciones no contempladas hasta el momento, concretamente en las proximidades de los puntos de consumo. En muchos casos, la DG puede proporcionar electricidad a un menor coste, proporcionando altos niveles de fiabilidad y de seguridad, y además, con menos consecuencias ambientales que las plantas clásicas de energía (carbón, nuclear, etc.). Los sistemas con DG emplean numerosas plantas, de tamaño

pequeño cada una, y puede proporcionar la energía en las proximidades donde se necesita, no teniendo casi dependencia de la red de distribución y la de transporte. La potencia de DG podrá variar en el rango de un kilovatio a los centenares de megavatio. Se puede decir por tanto que existen dos modelos de DG (Hernández, 2014), indicadas a continuación:

- DG a nivel local: son las plantas de generación que conocemos en los últimos años, granjas de turbinas eólicas o módulos fotovoltaicos para la producción de electricidad. Su localización suele ser en emplazamiento donde el recurso existente permita la implantación de una potencia elevada, pero siempre en una escala inferior a las grandes plantas térmicas o nucleares.
- DG a nivel punto final: consiste en aplicar directamente muchas de las tecnologías renovables descritas (eólica, fotovoltaica, hidráulica, etc.) en las dependencias de los consumidores directamente.

Potencia Instalada MW	2012	2013	2014	2015
Cogeneración	6.211	6.211	6.211	6.211
Solar Fotovoltaica	4.080	4.177	4.177	4.177
Solar Termoelectrica	1.551	2.521	2.521	2.521
Eólica	22.470	23.944	23.944	23.944
Hidráulica	2.063	2.063	2.063	2.063
Biomasa y Biogas	775	775	775	775
Residuos	456	456	456	456
Tratamiento de Residuos	658	658	658	658
Total	38.264	40.805	40.805	40.805

Tabla I. Previsión de la evolución de la potencia instalada en régimen especial. Fuente CNE

2012	2013	2014	2015
6.285	6.432	6.582	6.731
4.172	4.560	4.948	5.333
1.501	2.281	2.521	2.771
22.470	23.969	24.944	25.919
2.082	2.119	2.158	2.198
807	865	925	985
510	515	520	525
658	658	658	658
38.485	41.398	43.256	45.120

Tabla II. Previsión de la evolución de la potencia instalada de régimen especial antes de la entrada en vigor del Real Decreto- ley 1/2012 de 27 de enero. Fuente CNE

Los defensores de los consumidores, consideran que la DG puede mejorar la eficiencia del suministro de energía eléctrica. Consideran que la energía que transita desde las grandes plantas de producción hasta los consumos finales está sujeta a una pérdida de entre 4% y 9%, como consecuencia de las pérdidas por efecto Joule y la obsolescencia del equipamiento e instalaciones. Al mismo tiempo, los clientes sufren de mala calidad en la energía, con las variaciones de tensión eléctrica o porque el flujo de energía se ve afectado de una variedad de factores, incluyendo operaciones de conmutación, interrupciones, transitorios, y las perturbaciones de la red por las grandes cargas. Además, los clientes ven en sus facturas reflejado el gasto de las grandes infraestructuras de transporte y distribución, por lo que el uso de equipos de generación de energía.

Las instalaciones de DG ofrecen ventajas potenciales para mejorar la transmisión de energía, debido a que producir energía localmente para los usuarios, ayudará a toda la red mediante la reducción de la demanda en horas punta y reduciendo la congestión de potencia en la red, una de las causas del apagón de 2003.

Además, dado que la DG puede permanecer independiente de la red, posibilita proporcionar energía de emergencia para un gran número de servicios públicos, tales como hospitales, escuelas, aeropuertos, estaciones de bomberos y de policía, bases militares, prisiones, suministro de agua y plantas de tratamiento de aguas residuales y naturales de transporte de gas y sistemas de distribución y estaciones de comunicaciones. Por último, la DG puede ayudar a la nación a incrementar su diversidad de fuentes de energía, por ejemplo, algunas de las tecnologías de la DG, como las turbinas eólicas, paneles solares

fotovoltaicos y turbinas hidroeléctricas, no consumen combustibles fósiles. La creciente diversidad ayuda a aislar a la economía de las variaciones de precios, interrupciones, y la escasez de combustible.

Independientemente del modelo económico, y dejando a un lado las primas del sector, el sentido común dice que si existe potencial de generación eléctrica en los emplazamientos donde se consumen de manera continuada y masiva, debería poder aprovechar ese potencial y convertirlo en energía eléctrica, para de esta manera aumentar la eficiencia global del sistema, y contribuir a la mejora medio ambiental empleando tecnologías renovables. Además de lo anterior, los gobiernos deben ver la DG como una oportunidad de generación de empleo local, como se lleva años trabajando en este aspecto en UK, apoyado por un sistema de tarifas sostenible. La red del futuro deberá convivir con las plantas centralizadas y con la DG, tal y como se refleja en (Nissen, 2009), e indiscutiblemente la DG formará parte de los elementos disponibles entre los diferentes desarrolladores y planificadores de ciudades, teniendo siempre presente el impacto de la DG sobre la red actual, como se indica en (Hamedani & Arefifar, 2006), necesitando algoritmos optimizadores para el control.

IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA REDES DE DISTRIBUCIÓN

(Trebollé et al., 2012) realizaron un análisis técnico y conceptual del control tensión reactiva con DG, para posteriormente, (Trebollé et al., 2013) analizar en más detalle dicho impacto mediante el estudio de varias redes de distribución reales y representativas; las redes de estudio comprenden una red de alta tensión, cinco redes de media tensión y cuatro redes de baja tensión, que incluyen diferentes segmentaciones. Las principales conclusiones del estudio fueron:

- El impacto en las tensiones en redes de distribución típicas, debido a la inyección de potencia activa es mayor que el resultante de inyectar potencia reactiva, justo lo contrario que sucede en redes de transporte.
- Para escenarios de elevada penetración de DG, en las redes analizadas, la variación de las tensiones es del 5% para la red de alta tensión, entre el 1% y el 10% para las redes de media tensión y entre el 1% y el 10% para redes de baja tensión.
- La localización de la DG influye notablemente en las tensiones de las redes de distribución analizadas. El impacto de la inyección de potencia activa aumenta cuanto más nos alejamos de la cabecera de la línea, dado que se reducen las caídas de tensión en más tramos.
- El tipo de tecnología de DG afecta al nivel de tensión.
- Se han analizado tres controles de tensión para valorar el impacto de la DG. Para cada tipo de red, el control óptimo ha variado notablemente.
- Ya que la inyección de potencia activa en las redes de distribución por parte de la DG afecta notablemente en la tensión, se precisa definir un sistema de control de tensiones eficaz.

(González-Longatt et al., 2009) demuestran que con una operación acertada de la DG se puede regular la energía reactiva y, por tanto, el voltaje. El uso de las tecnologías basadas en los generadores sincrónicos directamente acoplados a la red, permite una muy buena controlabilidad de la energía reactiva, lo que hace posible que la estabilidad de voltaje aumente. Aunque algunos convertidores electrónicos de potencia, puede que no provean potencia reactiva, se debe saber que la integración de este tipo de unidades, tiene un impacto positivo en la estabilidad del voltaje. En cambio, el uso de tecnologías que consumen potencia reactiva de la red, por ejemplo, generadores distribuidos, disminuyen el margen de estabilidad de voltaje e incluso, con el uso de los bancos de condensadores para la compensación local del factor de potencia, aumenta el riesgo de un colapso del voltaje en la red.

(López et al., 2010) presentan una metodología para localizar y dimensionar DG con el fin de mejorar la regulación en sistemas de distribución, a partir del cálculo de indicadores de estabilidad y de la solución de un modelo matemático no lineal. La metodología planteada se aplicó a dos sistemas de prueba, para cada sistema se realizaron cuatro casos de estudio donde se consideraba una ubicación diferente para obtener el dimensionamiento adecuado de los DG y se verificaba el comportamiento de los perfiles de

tensión del sistema. En todos los casos desarrollados se mejoraron los niveles de tensión de todos los nodos, garantizando siempre que estos valores estuvieran dentro de los límites permitidos por la normativa vigente. En los casos propuestos se observa que al aumentar el número de generadores distribuidos que se conectan al sistema, el perfil de voltaje mejora significativamente, permitiendo que los niveles de voltaje se mantengan más estables, debido a que se reducen las caídas de tensión entre los nodos del sistema. (Richardot et al., 2006) demuestran el impacto positivo de la DG en el control de tensión de las redes de distribución. Los autores presentan un sistema para la coordinación y gestión eficiente de los niveles de tensión a través de la energía reactiva de la DG. (Viawan & Sannino, 2005) demuestran el efecto sobre las pérdidas en los feeders de baja tensión de redes con y sin DG. También presentan el apropiado tamaño de la DG y su operación para tratar de minimizar dichas pérdidas.

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN ÓPTIMA DE POTENCIA EN REDES CON PRESENCIA DE DG

El empleo de inversores de potencia con capacidad de generación de potencia reactiva en sistemas con elevada penetración de unidades de DG, en especial eólica y solar, facilita la gestión de grandes cantidades de potencia reactiva en el sistema. Dos aspectos destacan en las labores de planificación de los DSO a la hora de incorporar unidades de compensación de potencia reactiva en sus sistemas: por un lado, el punto óptimo de conexión y por otro el tamaño óptimo de dichas unidades.

Tradicionalmente, la gestión de la potencia reactiva en sistemas eléctricos estaba basada en la definición de complejas funciones objetivo y restricciones asociadas a la operación de los sistemas de potencia. En este trabajo, la definición del problema de gestión de potencia reactiva se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sistema se considera equilibrado.
- Se considera únicamente la componente a la frecuencia fundamental de la potencia activa y reactiva.
- El tamaño de las unidades de potencia reactiva es tratada como una variable continua.
- La capacidad de generación de potencia reactiva de las unidades de DG consideradas viene dada por los diagramas PQ de las tecnologías empleadas en el estudio.

La gestión de potencia reactiva en una red con presencia de DG se ha formulado de la siguiente forma:

Función objetivo

El objetivo de incorporar de forma óptima inversores de potencia con capacidad de generación en el sistema es maximizar la capacidad de abastecimiento de la demanda de un sistema de distribución con unidades de DG. Para ello se ha seleccionado una función objetivo en la cual se va a maximizar la carga del sistema.

$$\text{Max } F(x) = \lambda \quad (1)$$

Donde:

- x es el vector de variables del sistema: parámetro de carga del sistema, puntos de conexión y tamaño de las unidades de compensación de potencia reactiva.
- λ es la cargabilidad del sistema, máxima carga admisible en el sistema que respeta los límites de tensión establecidos (desviaciones del $\pm 5\%$ p.u.).

Restricciones

Las restricciones empleadas en la gestión óptima de la potencia son las siguientes:

- Ecuaciones del flujo de cargas.
- Límites de tensión en los nudos, estableciéndose un rango de valor admisible del $\pm 5\%$ p.u.

- Límites de capacidad de generación de las unidades de generación presentes en el sistema.
- Límites térmicos de líneas y transformadores.

Escenarios de carga

El presente estudio trata de realizar una gestión de la potencia en una red smartgrid centrándose en los aspectos relacionados con la estabilidad de tensión de los sistemas de potencia. Para ello es necesario desarrollar unos escenarios de carga que permitan determinar las condiciones de máxima cargabilidad admisibles por el sistema. Dichos escenarios de carga se van a generar a partir de las siguientes ecuaciones (2)-(3):

$$P_D(\lambda) = P_{D0}(1+\lambda K) \quad (2)$$

$$Q_D(\lambda) = Q_{D0}(1+\lambda K) \quad (3)$$

Donde

- P_{D0} y Q_{D0} son la potencia demanda en el sistema inicial.
- K es una constante que designa el ratio de modificación de la carga.
- λ representa el parámetro de carga ($\lambda=0$ representa la condición inicial de carga).

RESULTADOS

La metodología propuesta para la gestión de la potencia se ha aplicado a la red IEEE de 34 nudos [Salama & Chikhani, 1993]. La determinación del tamaño y punto de conexión óptimo de los dispositivos de compensación de potencia reactiva se ha realizado mediante un Algoritmo Genético (AG) que ha contemplado tres escenarios de penetración de generación eólica: 25%, 50% y 75%. La tabla 3 muestra los resultados del proceso de optimización. En ella se puede apreciar cómo la incorporación de inversores de potencia con capacidad de generación en la red permite aumentar tanto el grado de penetración de la DG como la demanda abastecida en el sistema hasta límites cercanos al 75% de la carga base demandada.

Caseo	SVC localización	Q_{inj} (MVAr)	λ_{max}
Sistema sin DG	-	-	0
25% de DG	27	2.77	0.06
50% de DG	11	2.95	0.30
	25	2.79	
75% de DG	10	2.15	0.74
	23	2.45	
	26	2.71	

Tabla III. Resultados del AG para la localización óptima de unidades SVC

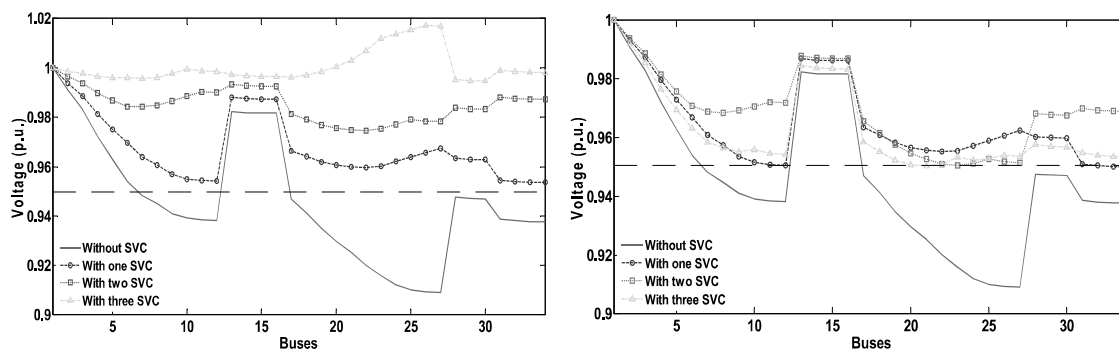


Figura 1. Perfil de tensiones para la red de estudio, demanda base y tres grados de penetración de DG

Figura 2. Perfil de tensiones para la red de estudio, máxima cargabilidad y tres grados de penetración de DG

Las figuras 1 y 2 muestran los perfiles de tensión del sistema de estudio para demanda base y máxima cargabilidad del sistema, ante los 3 escenarios de penetración de DG del estudio. Se puede observar que, gracias a la incorporación óptima de los inversores de potencia, es posible aumentar la carga abastecida en el sistema manteniendo la tensión dentro de los límites establecidos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología para la gestión óptima de potencia en redes Smartgrids con presencia de DG. Dicha gestión es realizada mediante un AG y se ha probado en una red de distribución bajo diferentes escenarios de integración de DG. A partir de los resultados obtenidos se puede comprobar que la gestión óptima de los dispositivos generadores en una red de distribución permite maximizar la penetración de la generación distribuida en la red de distribución manteniendo la estabilidad del sistema eléctrico ante escenarios de demanda variable. Además, se ha comprobado cómo la integración óptima de la DG permite mantener la tensión en los nudos del sistema dentro de los límites establecidos.

REFERENCIAS

- González-Longatt, F., Hernández, A., Guillén, F., Terán, R., Peraza, C. & Gavorskis, E., 2009. Efecto de la generación distribuida en la estabilidad de voltaje de los sistemas de potencia. In II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica, Margarita (Venezuela), 3-5 junio.
- Hernández, L., 2014. Aplicación de técnicas no lineales y otros paradigmas en Smart Grid/Microgrid/Virtual Power Plant. PhD Universidad de Valladolid (España).
- Hamedani, M.E. & Arefifar, S.A., 2006. Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy-loss reduction. IEE Proceedings-Generation, Transmission & Distribution, 153(2):127-136.
- López, M., Gallego, R.A. & Hincapié, R.A., 2010. Mejoramiento del perfil de tensión en sistemas de distribución usando generación distribuida. Scientia et Technica Año XVI, 44:310-315.
- Nissen, M.B., 2009. High performance development as distributed generation. IEEE Potentials, 28(6):25-31.
- Richardot, O., Viciu, A., Besanger, Y., Hadjsaid, N. & Kieny, C., 2006. Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Using Distributed Generation. In 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas (US), 21-24 mayo.
- Salama, M.M.A. & Chikhani, A.Y., 1993. A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, No. 3: pp 1529-1535.
- Treballe, D., Frías, P., Maza, J.M. & Martínez, J.L., 2012. El control de tensión con generación distribuida en redes de distribución. Revista Anales, marzo-abril.
- Treballe, D., Frías, P., Maza, J.M., Martínez, J.L. & Tello, J., 2013. El control de tensión con generación distribuida en redes de distribución (II). Revista Anales, marzo-abril.
- Viawan, F. & Sannino, A., 2005. Voltage control with distributed generation and its impact on losses in LV distribution systems. In 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg (Russia), 27-30 junio.